

ОСТАПЕЦЬ ЯРОСЛАВ

Український державний університет науки і технологій

<https://orcid.org/0000-0003-1976-5188>e-mail: oyar@i.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ВІЗУАЛЬНИХ МАРКЕРІВ У ЗАДАЧАХ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ВСЕРЕДИНИ ПРИМІЩЕНЬ

В роботі проведено дослідження ефективності застосування візуальних міток, таких як маркери ArUco, ARToolKitPlus та QR-коди, для локалізації автономних роботів, що переміщують вантажі на складських приміщеннях. Розроблено імітаційну модель у середовищі Matlab, за результатами моделювання отримано оцінку втрат в умовах помилок розпізнавання міток. Результати роботи можуть застосовуватися при створенні та аналізі ефективності алгоритмів локалізації на основі візуальних міток всередині приміщень.

Ключові слова: безпілотний транспортний засіб, локалізація, фідучіарні маркери, ArUco, ARToolKitPlus, QR-код, камера Jevois, імітаційна модель.

OSTAPETS YAROSLAV

Ukrainian State University of Science and Technologies

RESEARCH OF THE EFFICIENCY OF THE APPLICATION OF VISUAL MARKERS IN THE PROBLEMS OF LOCALIZATION INSIDE THE PREMISES

This paper examines the effectiveness of using visual markers such as ArUco, ARToolKitPlus and QR codes to localize autonomous robots moving goods in warehouses. Using a combination of ArUco, ARToolKitPlus and QR codes provides detailed information about the position of the unmanned vehicle in the warehouse, cargo identification and additional parameters, which together allows the successful use of the unmanned vehicle to move goods. The experiments were carried out on a JeVois-A33 smart machine vision camera with the JeVois Markers Combo software module. To configure the mode, the JeVois Inventor graphical interface was used. Experiments were carried out by scanning markers at right angles to the camera at a distance of 0.3 to 2 meters. Marker dictionaries with the smallest possible dimensions were used, namely 4 x 4 for ArUco and 3 x 3 for ARToolKitPlus. ArUco 4 x 4 dictionary values range from 0 to 49 (50 items) and ARToolKitPlus 3 x 3 dictionary values from 0 to 31 (32 items). 100 experiments were carried out for ArUco and 96 experiments for ARToolKitPlus. Based on the results of the experiments, the probabilities of correct recognition of each type of mark were determined. Possible errors in marker recognition and their impact on unmanned vehicles are analyzed, including the loss of additional motor resource, the loss of incorrect movement of cargo, as well as the loss of cargo due to incorrect reading of information. Based on the data obtained, a simulation model was created that takes into account all scenarios of correct and incorrect marker recognition. The model assumes a normal distribution of costs by vehicle resource, additional cargo movement and cargo cost. Simulations were carried out in Matlab for 100 000 experiments. Each scenario of marker recognition errors that could lead to losses was modeled separately. The average and total losses for each of the possible situations of recognition errors are determined. It has been established in which cases the greatest financial losses occur. The results of the work can be used to create and analyze the effectiveness of localization algorithms based on visual markers in a room.

Keywords: unmanned vehicle, localization, fiducial markers, ArUco, ARToolKitPlus, QR code, Jevois camera, simulation model.

Постановка проблеми

У сучасних умовах автоматизації та оптимізації логістичних процесів, використання автономних складських роботизованих та безпілотних систем для переміщення вантажів стає все більш актуальним. Завданням безпілотного транспортного засобу (БТЗ) є переміщення заданого вантажу на складі з одного стелажу на інший, або з полиці стелажу до кліті для подальшого відправлення. Одним з популярних варіантів є БТЗ з маркерною локалізацією і ідентифікацією вантажів. В роботі розглядаються три типи візуальних міток, що використовуються для вказаних задач: фідучіарні мітки ArUco та ARToolKitPlus, а також QR-коди.

Маркери ArUco застосовуються для локалізації БТЗ у просторі. Ці мітки забезпечують достатньо точне визначення місця розташування транспортного засобу в реальному часі, що необхідно для ефективної навігації. За допомогою маркерів ArUco система здатна визначати положення БТЗ щодо навколишнього середовища та приймати рішення про маршрут та переміщення відносно перешкод помічених такими мітками, що є особливо важливим при виконанні завдань в умовах обмеженого простору. Мітки локалізації можуть розташовуватися на підлозі та стелі, стінах і стовпах, стелажах і коробках, інших безпілотниках тощо.

Маркери ARToolKitPlus ідентифікують код вантажу, який перевозиться. Цей тип міток визначає унікальні коди, які допомагають системі розпізнавати та відстежувати вантаж у реальному часі. Ідентифікація вантажу за допомогою ARToolKitPlus дозволяє точно застосовувати маніпулятори безпілотника відносно цього конкретного вантажу, враховуючи його тип та габарити.

QR-коди надають додаткову інформацію про вантаж, розширюючи базові дані отримані після ідентифікації мітки ARToolKitPlus, що робить процес управління вантажем більш гнучким і адаптованим до конкретних вимог.

Таким чином, використання комбінації маркерів ArUco, ARToolKitPlus і QR-кодів забезпечує для системи керування БТЗ отримання детальної інформації про положення транспортного засобу на складському приміщенні, ідентифікацію вантажу та додаткові параметри, що в сукупності дозволяє успішно використовувати БТЗ для переміщення вантажів.

Аналіз досліджень та публікацій

Кожен візуальний маркер повинен мати унікальний набір характеристик, що дозволяє однозначно ідентифікувати його у просторі серед інших об'єктів та подібних маркерів. Однозначність визначається комбінацією кольорів, форм, кодів тощо. До головних вимог щодо застосування фідуціальних маркерів відносяться наступні: унікальність, висока контрастність, масштабованість, стійкість до перешкод. Ці критерії можуть бути досягнуті за допомогою кодування маркеру у вигляді 2D штрихового коду, що являє собою квадратну матрицю із чорних квадратних пікселів на білому фоні. Процес локалізації з використанням фідуціальних маркерів включає зйомку зображення зовнішньої обстановки на камеру, розпізнавання наявних маркерів за допомогою комп'ютерного зору і обчислення точного положення засобу в просторі за допомогою математичних алгоритмів [1].

ARToolKit (augmented reality toolkit) створювалася для полегшення побудови інтерактивних додатків доповненої реальності (AR-програм), де віртуальні об'єкти можуть взаємодіяти з реальним світом, відображаючись поверх реальних фізичних об'єктів за допомогою камери та доповненої інформації [2]. Бібліотека ArUco (augmented reality University of Cordoba) призначена для виявлення квадратних фідуціальних маркерів на зображеннях [3]. QR-коди (quick response code) є універсальним засобом, розроблений японською компанією Denso Wave для швидкого читання великого об'єму даних [4].

В роботі [5] експериментально визначено можливість коректного розпізнавання для вказаних типів маркерів в залежності від освітлення, кута розташування, відстані до камери та інших параметрів. Також відомі роботи, у яких розглядається ефективність застосування маркерів при різних кутах сканування, різному освітленні, оклюзії камери тощо [3, 6–9].

Метою роботи є дослідження ефективності алгоритму локалізації безпілотних транспортних засобів та ідентифікації вантажу на основі використання візуальних маркерів типу ARToolKit, ArUco і QR-коду на імітаційній моделі. В роботі відповідно до мети поставлені такі задачі: аналіз та визначення ситуацій (подій) коректного та некоректного розпізнавання міток, що можуть призводити до втрат, побудова моделі, що імітує відповідні ситуації та моделювання на ній можливих втрат.

Виклад основного матеріалу

Для проведення експериментів використано розумну камеру машинного зору JeVois-A33 з програмним модулем JeVois Markers Combo для одночасного розпізнавання міток типу QR, ARToolKit і ArUco та графічний інтерфейс JeVois Inventor. Використовувалися словники маркерів з мінімальними можливими розмірностями, а саме 4×4 для ArUco та 3×3 для ARToolKitPlus. Діапазон значень словника ArUco 4×4 становить від 0 до 49 (50 штук), а для словника ARToolKitPlus 3×3 від 0 до 31 (32 штуки).

В результаті серії експериментів в [5] визначено ймовірності правильного розпізнавання міток при скануванні під прямим кутом відносно камери на діапазоні відстані до камери від 0,3 до 2 метрів. На можливому діапазоні відстаней для кожного можливого значення міток ArUco було проведено 100 експериментів (по 2 експерименти на кожен маркер), в 99 із яких розпізнавання спрацює вірно, а отже ймовірність розпізнавання $P(AU) = 0,99$. Аналогічно проведено 96 експериментів для міток ARToolKitPlus (по 3 експерименти на кожен маркер) на тому самому діапазоні відстаней. За результатами, мітки з номерами 5, 11 та 13 помилково розпізнаються, як мітки з іншими номерами цього ж словника, або як мітки із словника ArUco. В 90 випадках із 96 розпізнавання проведено нормально, а отже ймовірність розпізнавання $P(ATK) = 0,9375$. Розпізнавання QR-кодів відбувається краще за все на маленьких відстанях, в середньому успішним розпізнавання можна вважати у 9 з 10 випадків, а отже ймовірність розпізнавання $P(QR) = 0,9$.

Мітки всіх застосованих для вирішення задачі типів можуть не розпізнаватися або розпізнаватися невірно. У зв'язку з цим, при керуванні БТЗ можливі ситуації виникнення помилок, що призводять до матеріальних втрат: помилки визначення локалізації, некоректне визначення ідентифікатора (номера) вантажу, помилки зчитування критично важливої додаткової інформації про вантаж.

Внаслідок помилкового визначення локалізації (або взагалі її не визначення), можуть виникати втрати, пов'язані з необхідністю пошуку БТЗ маркеру локалізації або простого БТЗ в очікуванні. Це втрати на додатковий моторесурс БТЗ. Як наслідок помилкового визначення ідентифікатора вантажу, можуть виникати втрати, пов'язані з помилковим переміщенням вантажу не за місцем його призначення. Це втрати на додаткове зворотне переміщення вантажу. В разі помилки зчитування критично важливої додаткової інформації про вантаж (або взагалі її не зчитування), можлива втрата або псування вантажу. Це втрати на компенсацію вартості вантажу. Прикладами критично важливої додаткової інформації про вантаж є інформація про те, що вантаж ще не готовий для переміщення (наприклад, пакування не запечатане), вантаж вимагає особливих умов перевезення тощо (крихкий, лише вертикальне розташування і т.і.).

Таким чином, для побудови імітаційної моделі достатньо розглянути всі можливі ситуації коректного та некоректного розпізнавання міток та відповідні можливі втрати. Як видно з даних таблиці 1, всього може виникати сім таких ситуацій. Відповідно до даних таблиці 1 передбачається, що у випадку помилки розпізнавання мітки локалізації (фактично – її не визначення), розпізнавання міток інших типів не виконується до наступного коректного розпізнавання мітки локалізації.

В розробленій моделі враховувалися лише можливі втрати (збитки), тобто звичайні нормальні експлуатаційні витрати на використання БТЗ не враховувалися. За результатами роботи моделі можна оцінити можливі втрати для кожної з ситуацій помилок розпізнавання міток та середні втрати на одну операцію з вантажем з використанням БТЗ.

Таблиця 1

Можливі втрати, пов'язані з помилками розпізнавання міток

№ з/п	Комбінації розпізнаних системою міток			Вид можливих втрат
	Локалізація (ArUco)	Код вантажу (ARToolKitPlus)	Додаткова інформація про вантаж (QR-код)	
1	н/в	—	—	Втрати на додатковий моторесурс БТЗ
2	+	в/н	+	Втрати на переміщення вантажу
3	+	в/н	н/важл.	Втрати на переміщення вантажу
4	+	в/н	важл.	Втрата вантажу
5	+	+	важл.	Втрата вантажу
6	+	+	н/важл.	Втрат немає
7	+	+	+	Втрат немає

Примітки:

«+» – мітку розпізнано вірно;

«н/в» – мітку не розпізнано (не визначено);

«в/н» – мітку визначено невірно (як іншу мітку);

«н/важл.» – мітку не розпізнано, але вона не містила важливої інформації;

«важл.» – мітку не розпізнано та вона містила критично важливу інформацію;

«—» – не має значення.

В імітаційній моделі прийнято такі припущення:

– вартість моторесурсу БТЗ C_m розподілена за нормальним законом з відомими значеннями математичного очікування та дисперсії;

– вартість додаткового переміщення вантажу C_n розподілена за нормальним законом з відомими значеннями математичного очікування та дисперсії;

– вартість вантажу C_v розподілена за нормальним законом з відомими значеннями математичного очікування та дисперсії;

– ймовірність того, що додаткова інформація про вантаж, яка міститься в мітці, що не була розпізнана, є критичною для виконання операції з вантажем дорівнює $P_k=0,5$.

Отже, завдяки останньому припущенню, в половині ситуацій помилок розпізнавання міток з додатковою інформацією про вантаж відбудеться втрата вантажу, а в іншій половині – ні.

Для моделювання випадків помилкового розпізнавання кожного з трьох типів міток використано ймовірності таких подій, які раніше отримані експериментальним шляхом. Для створення імітаційної моделі було обрано пакет прикладного програмного забезпечення Matlab. Моделювання проводилося для загальної кількості $N = 100\,000$ експериментів переміщення вантажу, результати отримано по кожній окремій події.

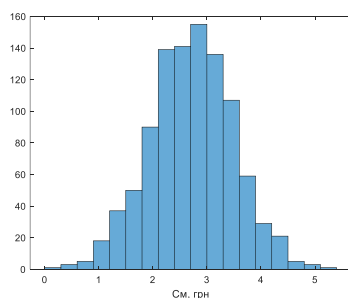
Кожна з п'яти ситуацій помилок розпізнавання міток, в результаті яких можуть виникати втрати, в моделі імітувалася окремо. Втрати, отримані по кожному типу ситуацій наведені в таблиці 2, а гістограми розподілення втрат по їх типам (втрати на додатковий моторесурс БТЗ, втрати на переміщення вантажу та втрати самого вантажу) – на рис. 1, відповідно.

Таблиця 2

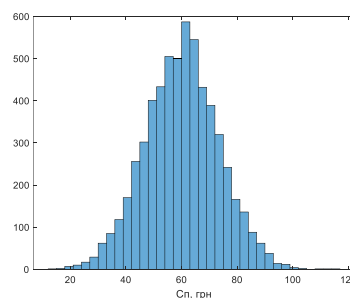
Втрати, отримані за результатами моделювання

№ ситуації	Загальна кількість ситуацій	Середня втрата, грн	Сумарні втрати, грн.
1	1000	2.77	2769.06
2	5625	60.07	337897.89
3	312	60.71	18941.85
4	312	1020.66	318445.21
5	4688	1000.26	4689216.72
Разом	11937	449.63	5367270.73

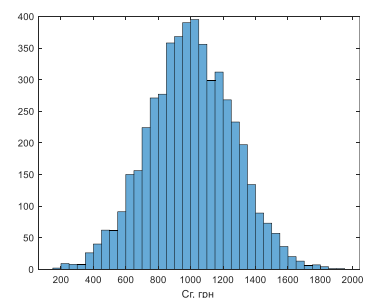
Як видно з отриманих даних (див. табл. 2), спостерігається найбільша кількість ситуацій типу 2, але найбільші втрати виникають у зв'язку з ситуацією 5.



а)



б)



в)

Рис. 1. Гістограми розподілу втрат: а) на додатковий моторесурс БТЗ; б) на додаткове переміщення вантажу; в) на псування вантажу

Висновки

Проведено дослідження ефективності застосування візуальних міток для задач локалізації в БТЗ. Виконано аналіз ситуацій можливих втрат, що пов'язані з помилками розпізнавання міток. За результатами аналізу даних, отриманих шляхом імітаційного моделювання вказаних ситуацій можна надати наступні рекомендації з підвищення ефективності системи:

- для кодування додаткової інформації про вантаж використовувати замість QR-кодів мітки іншого типу з більшою ймовірністю коректного розпізнавання;
- при кодуванні ідентифікатора вантажу виключити ті комбінації кодів, які помилково розпізнаються, як інші.

Подібні до розглянутих у даній роботі рішення можуть знайти застосування в транспортних компаніях, поштових службах, інтернет-магазинах і т.і. та потребують подальшого розвитку і дослідження.

Література

1. Lightbody P., Krajník T., Hanheide M. An Efficient Visual Fiducial Localisation System. *Applied Computing Review*. 2017. Issue 3. p. 28-37. URL: <https://doi.org/10.1145/3161534.3161537>
2. Pătru G-C., Pîrvan A-I., Rosner D., Rughiniş R-V. Fiducial marker systems overview and empirical analysis of ArUco, AprilTag and CCTag. *U.P.B. Sci. Bull. Series C*. 2023. Vol. 85. Iss. 2. p. 49–62.
3. Generation of fiducial marker dictionaries using Mixed Integer Linear Programming / S. Garrido-Jurado et al. *Pattern Recognition*. 2016. Vol. 51. P. 481–491. URL: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2015.09.023> Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion / S. Garrido-Jurado et al. *Pattern Recognition*. 2014. Vol. 47, no. 6. P. 2280–2292. URL: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2014.01.005>
4. QR code.com. History of QR Code. *Denso Wave Incorporated*. URL: <https://www.qrcode.com/en/history/>
5. Ostapets, Y., Dziuba, V., (2023). Peculiarities of systems and algorithms for caravanning by unmanned vehicles. In: Modern information and communication technologies on a transport, in industry and education: Abstracts of the XVII International Conference, 13-14 December 2023, Dnipro. Dnipro: USUST - 152 p.
6. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion / S. Garrido-Jurado et al. *Pattern Recognition*. 2014. Vol. 47, no. 6. P. 2280–2292. URL: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2014.01.005>
7. Benligiray B., Topal C., Akinlar C. STag: A stable fiducial marker system. *Image and Vision Computing*. 2019. Vol. 89. P. 158–169. URL: <https://doi.org/10.1016/j.imavis.2019.06.007>
8. Virtual Experiments on ArUco and AprilTag Systems Comparison for Fiducial Marker Rotation Resistance under Noisy Sensory Data / A. Zakiev et al. 2020 *International Joint Conference on Neural Networks*, Glasgow, United Kingdom, 19–24 July 2020. 2020. URL: <https://doi.org/10.1109/ijcnn48605.2020.9207701>
9. Xiang Zhang, Frönz S., Navab N. Visual marker detection and decoding in AR systems: a comparative study. *IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, Darmstadt, Germany. URL: <https://doi.org/10.1109/ismar.2002.1115078>